

УДК 621.398

Д. А. Бондаренко, В. Е. Карасик,
В. П. Семенов

УПРАВЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫМ СПЕКТРОМ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА С ПОМОЩЬЮ ЧАСТОТНО-МАНИПУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ В ЛАЗЕРНЫХ СКАНИРУЮЩИХ СИСТЕМАХ ТЕЛЕОРИЕНТАЦИИ

На основе оконного преобразования Фурье проанализированы мгновенные спектры интенсивности многолучевых дифракционных порядков на выходе акустооптического дефлектора, управляемого сигналом с частотной манипуляцией. По результатам численного моделирования и экспериментальной проверки даны рекомендации по выбору параметров управляющих сигналов, обеспечивающих получение квазиравномерных опорных полей в сканирующих системах телеориентации.

E-mail: bondar_art@mail.ru

Ключевые слова: акустооптический дефлектор, частотно-манипулированный сигнал, многолучевой дифракционный порядок, оконное фурье-преобразование, эффективная временная апертура дефлектора, система телеориентации.

Совершенствование оптико-электронных приборов и усложнение задач, решаемых с их помощью, в последние годы все чаще требует применения быстродействующих малогабаритных оптико-электронных устройств, осуществляющих сканирование лазерного пучка в пространстве. Одной из возможных реализаций таких приборов с рядом уникальных характеристик являются анизотропные акустооптические дефлекторы, обеспечивающие перемещение пучка из одного пространственного положения в другое за время 10...20 мкс независимо от расстояния между этими положениями в пределах рабочей полосы частот дефлектора, причем в режиме линейной частотной модуляции управляющего сигнала угловая скорость сканирования может достигать 1000 рад/с [1]. Двухкоординатные акустооптические дефлекторы нашли широкое практическое применение в лазерных сканирующих системах телеориентации, предназначенных для сопровождения высокоскоростных объектов, проводки судов по фарватеру, а также в системах стыковки и автоматических системах посадки летательных аппаратов.

Принцип действия сканирующей системы телеориентации основан на создании с помощью лазерного пучка и двухкоординатного акустооптического дефлектора пространственно-временного распределения интенсивности излучения — опорного поля, в котором ориентируется управляемый объект. Поэтому основное внимание при разработке систем телеориентации уделяют вопросам создания опорных полей с заданными качественными характеристиками, и здесь одной из основных проблем является формирование опорных полей с квазиравномерным заполнением площади опорного поля лазерным излучением.

При использовании акустооптических дефлекторов решение этой проблемы может быть осуществлено путем управления пространственным спектром дифрагированного пучка в целях формирования многолучевой диаграммы направленности пучка, образующей достаточно широкое угловое распределение интенсивности без заметных энергетических провалов.

В работе [2] описан метод управления пространственным спектром дифрагированного пучка в акустооптическом дефлекторе, основанный на дифракции падающего излучения на поличастотной акустической волне, формируемой набором генераторов с фазосдвигающими цепями. Суть метода состоит в вычислении фазовых сдвигов отдельных спектральных компонент сигнала, обеспечивающих формирование многолучевой диаграммы из лучей с одинаковой интенсивностью. Недостатком этого метода является большая сложность при его практической реализации, поскольку в данном случае требуется наличие нескольких параллельных управляемых генераторов с возможностью задания произвольного фазового сдвига для каждого из них. Однако схожий по результатам режим управления дефлектором можно реализовать, используя один генератор, когда управляющие частоты меняются последовательно [3], что значительно проще осуществить на практике.

Как показано в работе [2], для анализа акустооптического взаимодействия при определенных допущениях может быть использовано выражение для пространственного спектра дифрагированного пучка вида

$$\tilde{E}_d(k_x, t) \cong \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{s}(\omega) \exp(-i\omega t) \tilde{E}_i\left(k_x - \frac{\omega}{v}\right) d\omega, \quad (1)$$

где $\tilde{E}_i(k_x)$ — пространственный спектр падающего пучка; k_x — волновой вектор света; v — скорость распространения акустической волны; $\tilde{s}(\omega)$ — спектр модулирующего сигнала, определяемый фурье-преобразованием исходного сигнала $s(t)$:

$$\tilde{s}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \exp(-i\omega t) dt. \quad (2)$$

Однако его применение ограничивается модулирующими сигналами со стационарным спектром. Проблема состоит в том, что после фурье-преобразования сигнала (2) теряется информация о временной эволюции частот и результат акустооптического взаимодействия для некоторых видов сигналов может существенно отличаться от результата, получаемого на основе выражения (1).

Снять указанные ограничения возможно, если отказаться от предварительного получения фурье-образа модулирующего сигнала $\tilde{s}(\omega)$, а использовать при анализе акустооптического взаимодействия непосредственно сам сигнал $s(t)$, преобразовав определенным образом выражение (1).

Если амплитуда поля падающего лазерного пучка с точностью до постоянного множителя описывается функцией Гаусса

$$E_i(x) \cong \exp\left(-\frac{x^2}{w_0^2}\right), \quad (3)$$

где w_0 — радиус сечения перетяжки по уровню e^{-1} , то его пространственный спектр равен

$$\tilde{E}_i(k_x) = \int_{-\infty}^{+\infty} E_i(x) \exp(-ik_x x) dx = \exp\left(-\frac{1}{4}k_x^2 w_0^2\right). \quad (4)$$

Введем частотную переменную $\eta_x = vk_x$ и преобразуем (4) к виду

$$\tilde{E}_i(\eta_x) = \exp\left(-\frac{1}{4}\frac{\eta_x^2 w_0^2}{v^2}\right). \quad (5)$$

На основе полученного выражения можно ввести *эффективную временную апертуру* акустооптического дефлектора τ_{eff} , определяемую временем прохождения акустической волной лазерного пучка сечением $2w_0$:

$$\tau_{eff} = \frac{2w_0}{v}. \quad (6)$$

Подставляя (6) в (5), получаем

$$\tilde{E}_i(\eta_x) = \exp\left(-\frac{1}{16}\eta_x^2 \tau_{eff}^2\right). \quad (7)$$

Комплексно-сопряженное выражение для произведения второго и третьего сомножителей под интегралом в (1) с учетом (7) обозначим

$$\tilde{G}(\eta_x) = \exp[-it(\eta_x - \omega)] \exp\left[-\frac{\tau_{eff}^2}{16}(\eta_x - \omega)^2\right]. \quad (8)$$

Выполняя обратное преобразование Фурье (8), получаем

$$G(t) = \exp(i\omega t) \exp\left[-\frac{4(t-t')^2}{\tau_{eff}^2}\right], \quad (9)$$

где t' — произвольный момент времени.

Далее на основе равенства Парсеваля можно записать

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{s}(\omega) \tilde{G}^*(\eta_x - \omega) d\eta_x = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) G^*(t - t') dt. \quad (10)$$

Смысл выражения (10) в том, что информация, получаемая при рассмотрении сигнала $s(t)$ в окрестности $t = t'$ с использованием временного окна $G(t)$, может быть получена при наблюдении спектра $\tilde{s}(\omega)$ сигнала в окрестности частоты $\eta_x = \omega$ в частотном окне $\tilde{G}(\eta_x)$. Таким образом, с точностью до постоянного множителя пространственный спектр дифрагированного пучка можно описать соотношением

$$\tilde{E}_d(\omega, t') \cong \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \exp(-i\omega t) \exp\left[-\frac{4(t-t')^2}{\tau_{eff}^2}\right] dt, \quad (11)$$

а угловое распределение интенсивности —

$$I(\theta_x, t') = \tilde{E}_d(\omega, t') \times \tilde{E}_d^*(\omega, t'). \quad (12)$$

Выражение (11) математически эквивалентно (1), но позволяет работать непосредственно с самим модулирующим сигналом $s(t)$ в реальном масштабе времени, а не с его фурье-образом, как в (1), что существенно расширяет область применения (11) при анализе сложных управляющих сигналов акустооптических дефлекторов.

Можно отметить, что (11) представляет процесс акустооптического взаимодействия как фурье-преобразование модулирующего сигнала $s(t)$ с окном $G(t)$ [4]. Рассмотрим подробнее $G(t)$. Положим в (9) $t' = 0$, $\tau_{eff} = 8$, $\omega = 2\pi$ и построим вещественную (рис. 1, а) и мнимую (рис. 1, б) части функции-окна $G(t)$.

Как следует из рис. 1, ядро преобразования в (11) ограничено во времени в отличие от ядра преобразования Фурье, состоящего из бесконечных во времени гармоник. Очевидно, что (11) локализует часть сигнала $s(t)$ в момент времени t' в окне $G(t)$ со среднеквадратическим размером

$$\tau_{СКВ} = \tau_{eff}/2. \quad (13)$$

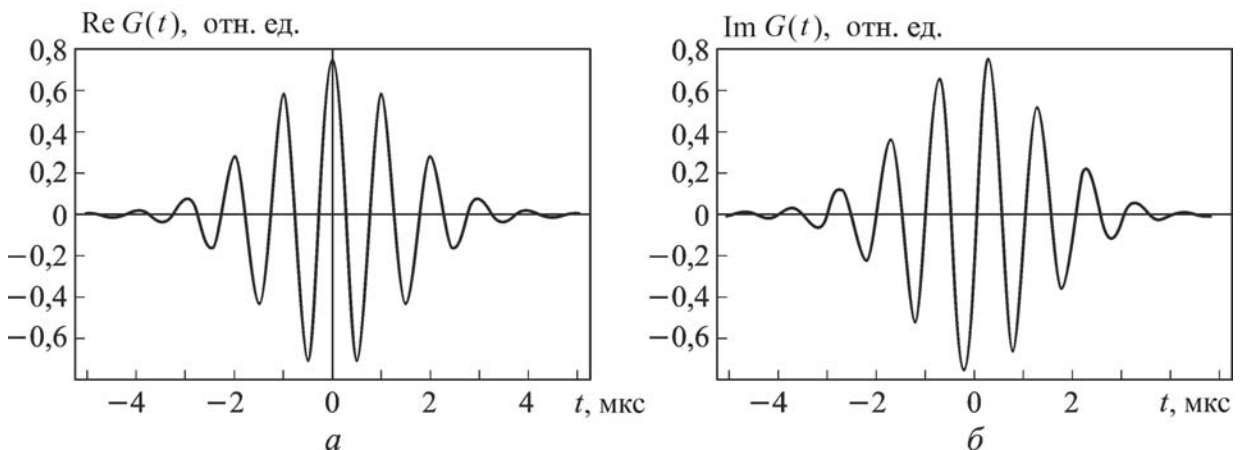


Рис. 1. Вещественная (а) и мнимая (б) части функции-окна $G(t)$

Это означает, что спектр дифрагированного пучка в каждый момент времени определяется спектром сигнала, заполняющего временное окно $G(t)$, т.е., акустооптический дефлектор “видит” только ту часть управляющего сигнала, которая заполняет окно (временное, пространственное и частотное) в данный момент времени.

Поскольку было продемонстрировано, что фурье-преобразование $G(t)$ также является гауссовой функцией, хорошо локализованной в частотной области, можно считать, что акустооптический дефлектор обладает также и частотным окном со среднеквадратическим размером, как следует из (8), равным

$$\Delta\omega_{\text{СКВ}} = \frac{4}{\tau_{\text{eff}}}. \quad (14)$$

Произведение размеров окон во временной и частотной областях определяет форму частотно-временного окна, в котором локализуется сигнал,

$$\Delta\omega_{\text{СКВ}}\tau_{\text{СКВ}} = 2. \quad (15)$$

Для исследования влияния на спектр дифрагированного пучка модулирующей функции $s(t)$ с применением подхода (11) была получена модель частотно-манипулированного (ЧМп) сигнала без разрыва фазы в виде

$$s(t) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=1}^N \exp\{-i2\pi f_k [t - (n-1)T_f - mT_0 + \psi_{0,k}]\} \times \\ \times \text{rect}\left\{\frac{1}{T_0} [t - (n-0,5)T_f - mT_0]\right\}, \quad (16)$$

где $f_k \in (f_1, f_2, \dots, f_n, f_{n+1}, \dots, f_{N(M+1)})$ — k -я частота сигнала; $n \in (1, 2, \dots, N)$, N — число частот на периоде модулирующей функции T_0 ; $k = n + N \times M$ — порядковый номер частоты сигнала; T_f — период одной частоты f_k ; $\psi_{0,k}$ — начальная фаза для каждой частоты, определяемая из рекурсивного соотношения $\psi_{0,k} = \frac{f_{k-1}}{f_k} (T_f + \psi_{0,k-1})$; $m \in (0, 2, \dots, M-1)$ — число периодов модулирующего сигнала; $\text{rect}\{\cdot\}$ — прямоугольная функция.

На рис. 2 представлены два периода ЧМп сигнала, построенного на основе (16) при $\psi_{0,1} = 0$ и состоящего из четырех последовательно идущих сфазированных частот.

В виду математической сложности выражений, получаемых при подстановке модели управляющего сигнала (16) в соотношение (11), описывающее процесс акустооптического взаимодействия, получить решение задачи в общем виде не представляется возможным. Однако с помощью численных подстановок (16) в (11) можно получить

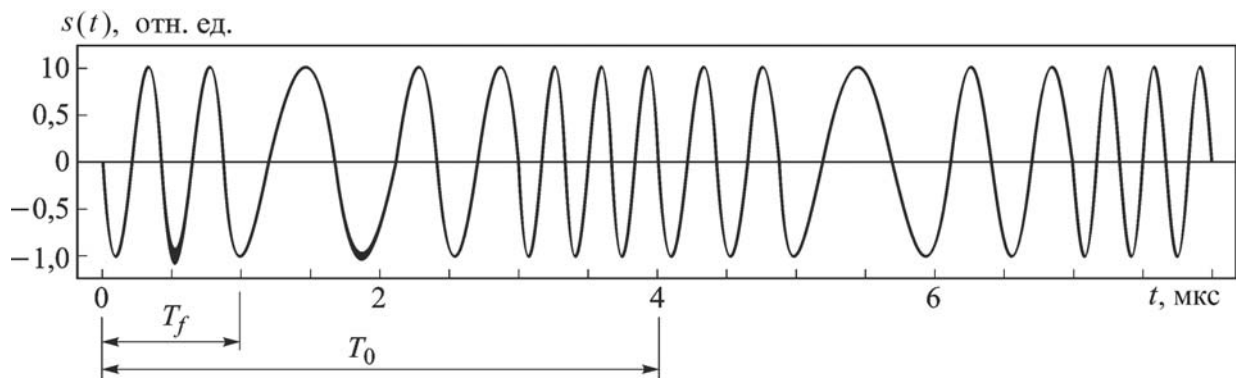


Рис. 2. Пример сигнала с частотной манипуляцией

точные решения в определенные временные моменты существования управляющего сигнала.

Всю совокупность результатов численного моделирования, выполненных на основе выражений (11), (16), целесообразно разделить на три области параметров модулирующего сигнала, в которых, как можно будет убедиться далее, спектр дифрагированного пучка имеет качественные различия.

К первой области отнесем модулирующие сигналы, для которых период модулирующей функции T_0 меньше эффективной временной апертуры дефлектора τ_{eff} , т.е. $T_0 < \tau_{eff}$. Вторая область характеризуется примерным равенством этих параметров. К третьей отнесем модулирующие сигналы, у которых $T_0 > \tau_{eff}$.

Экспериментальные исследования для проверки предложенного подхода проводились на установке, структурная схема которой представлена на рис. 3.

Излучение от лазера с длиной волны 1,06 мкм, расширенное до размеров эффективной апертуры дефлектора, направлялось на первый акустооптический дефлектор АОД_x, на который поступал исследуемый ЧМп сигнал $s(t)$, под действием которого падающий пучок после дифракции изменял пространственный спектр в вертикальной плоскости. Затем пучок попадал на второй акустооптический дефлектор АОД_y, развернутый по отношению к первому дефлектору на 90°,

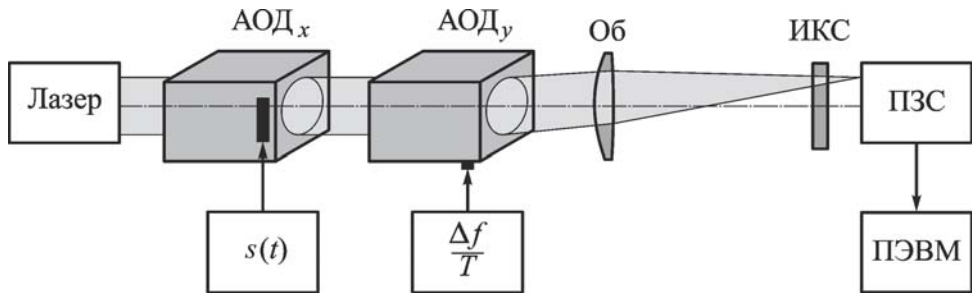


Рис. 3. Схема экспериментальной установки:

АОД — акустооптический дефлектор, Об — объектив, ИКС — инфракрасный светофильтр, $s(t)$ — исследуемый ЧМп сигнал, ПЗС — камера на основе матрицы прибора с зарядовой связью, ПЭВМ — персональная электронно-вычислительная машина

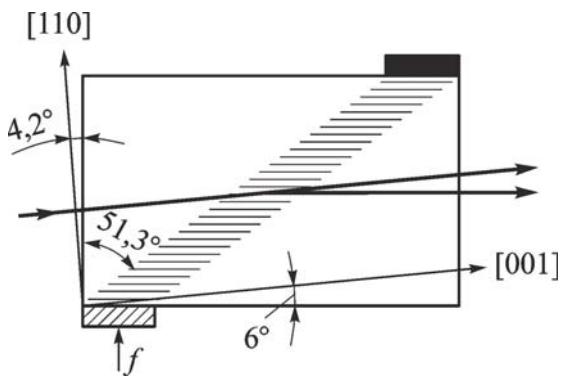


Рис. 4. Геометрия акустооптического взаимодействия анизотропного дефлектора на парателлурите, используемого в эксперименте [5]

который осуществлял быстроедействующую горизонтальную развертку пучка под действием линейно частотно-модулированного сигнала $\Delta f/T$. Получаемое пространственно-временное распределение интенсивности регистрировалось измерительной ПЗС-камерой Spiricon (Ophir Inc.), установленной в фокальной плоскости длиннофокусного объектива Об, и фиксировалось на ПВМ для последующего анализа.

В экспериментах использовался анизотропный акустооптический дефлектор на парателлурите (TeO_2) с геометрией акустооптического взаимодействия, показанной на рис. 4, характерной особенностью которой является возбуждение звуковой волны с волновым фронтом, идущим под углом около 6° к направлению $[001]$ кристаллографической оси, что обеспечивает получение широкой полосы управляющих частот (не менее 30 МГц) с высокой эффективностью дифракции, центральной частотой 80 МГц и размером эффективной временной апертуры дефлектора $\tau_{eff} = 8$ мкс.

Рассмотрим первую область параметров сигнала, характеризующуюся выполнением условия

$$T_0 < \tau_{eff}, \quad (17)$$

где T_0 — период модулирующей функции.

На рис. 5–7 показаны результаты моделирования и экспериментального исследования дифрагированного пучка при различном законе изменения частоты $f(t)$ управляющего сигнала $s(t)$ (первая колонка), а также рассчитанного по (11) и (12) углового распределения интенсивности в мегагерцах (вторая колонка). Вид одной строки опорного поля, зафиксированный ПЗС-камерой, представлен в третьей колонке, а в четвертой показано распределение интенсивности в вертикальном сечении строки, указанном белой штриховой линией. На рис. 5, а показан случай, когда на первый дефлектор поступает сигнал с центральной частотой 80 МГц. При этом дифрагируемый на монохроматической акустической волне в первом дефлекторе пучок сохраняет пространственную структуру падающего пучка и разворачивается в горизонтальную строку при помощи второго дефлектора. Далее на рис. 5, б–г показаны управляющие сигналы с периодом модулирующей функции $T_0 = 2, 3$ и 4 мкс при девиации частоты $\Delta\omega = 0,36; 0,36$

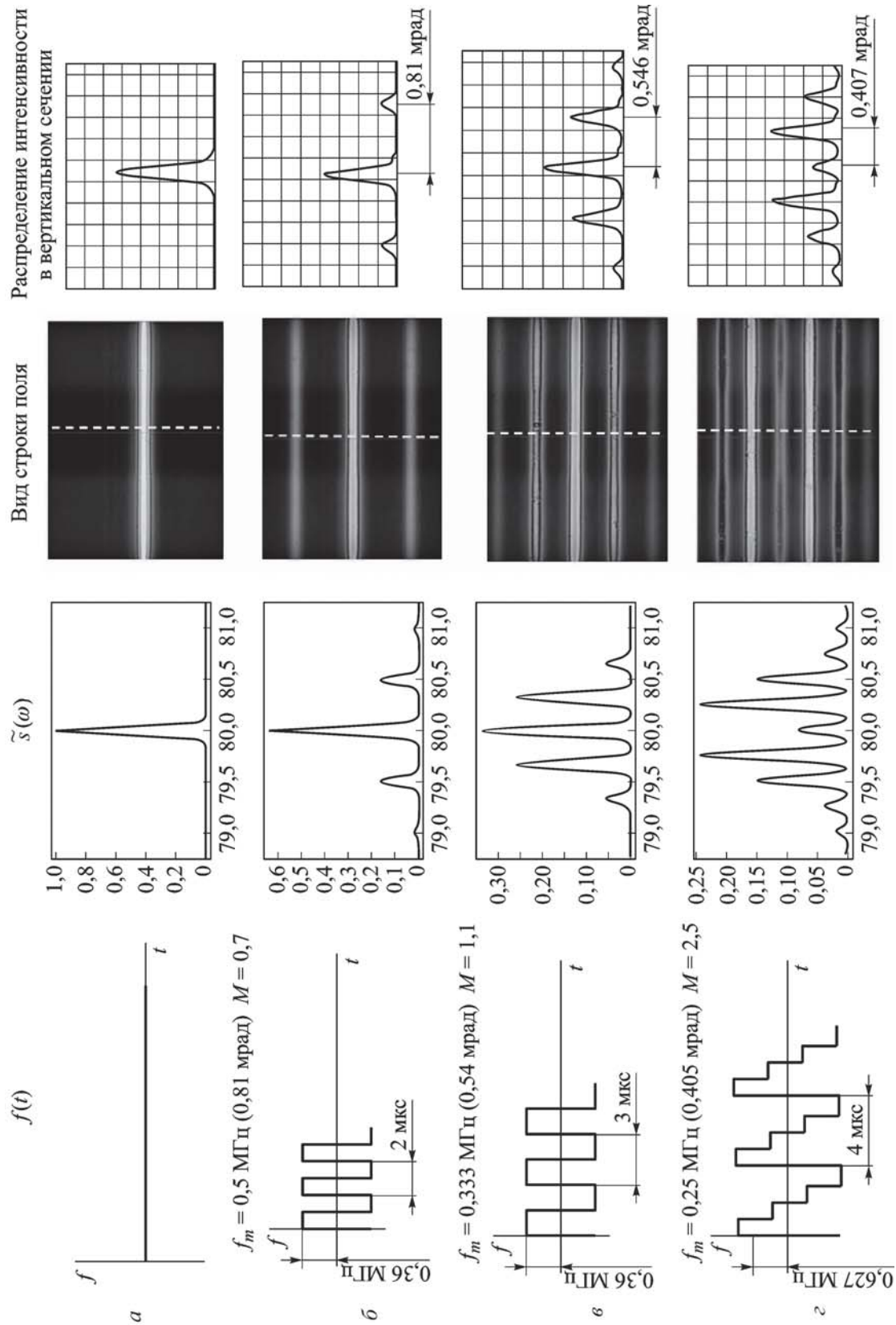


Рис. 5. Управляющие сигналы, вычисленный пространственный спектр интенсивности, вид фрагмента строки опорного поля и поперечное распределение интенсивности в строке при $T_0 < \tau_{eff}$

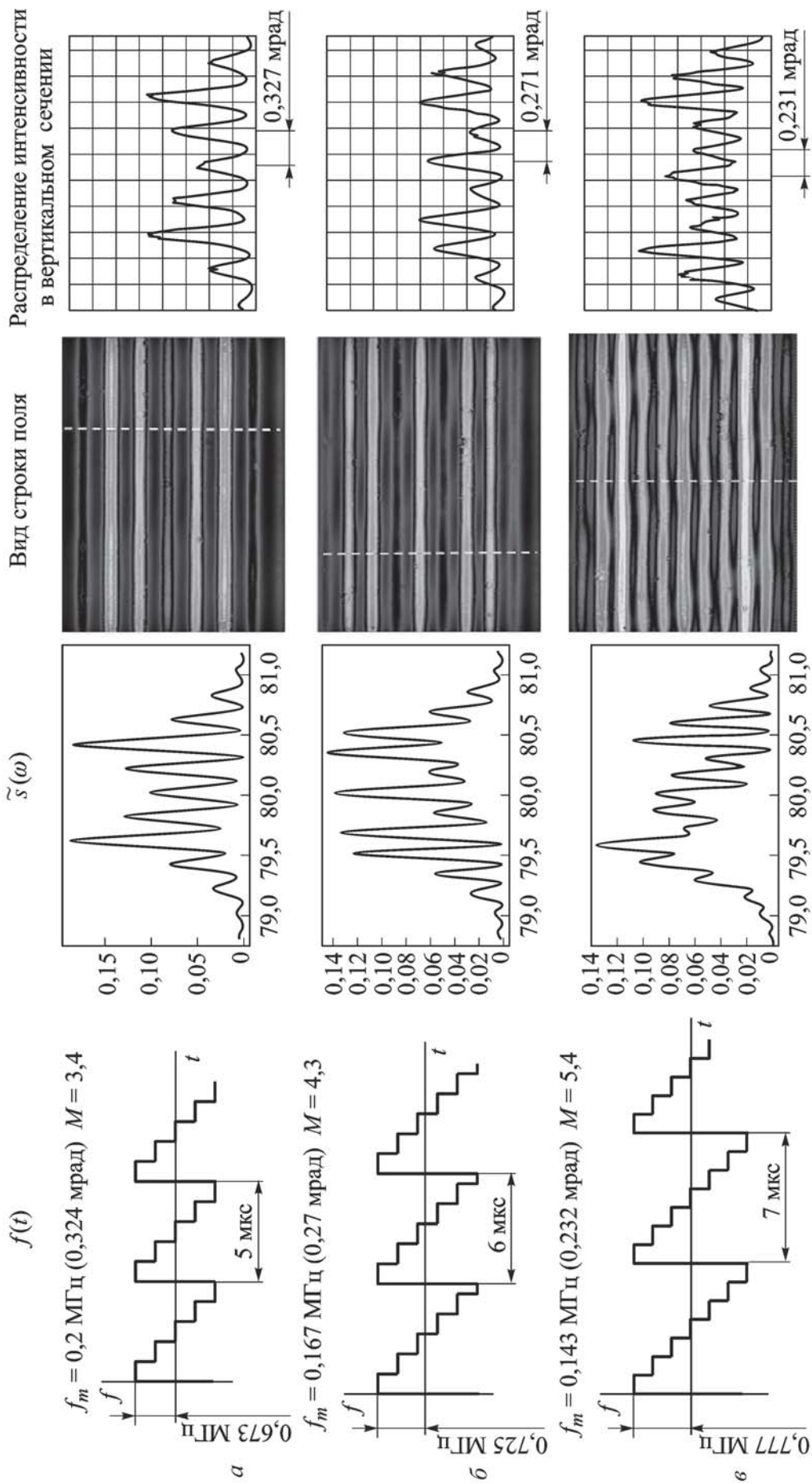


Рис. 6. Управляющие сигналы, вычисленный пространственный спектр интенсивности, вид фрагмента строки опорного поля и поперечное распределение интенсивности в строке при $T_0 \approx \tau_{eff}$

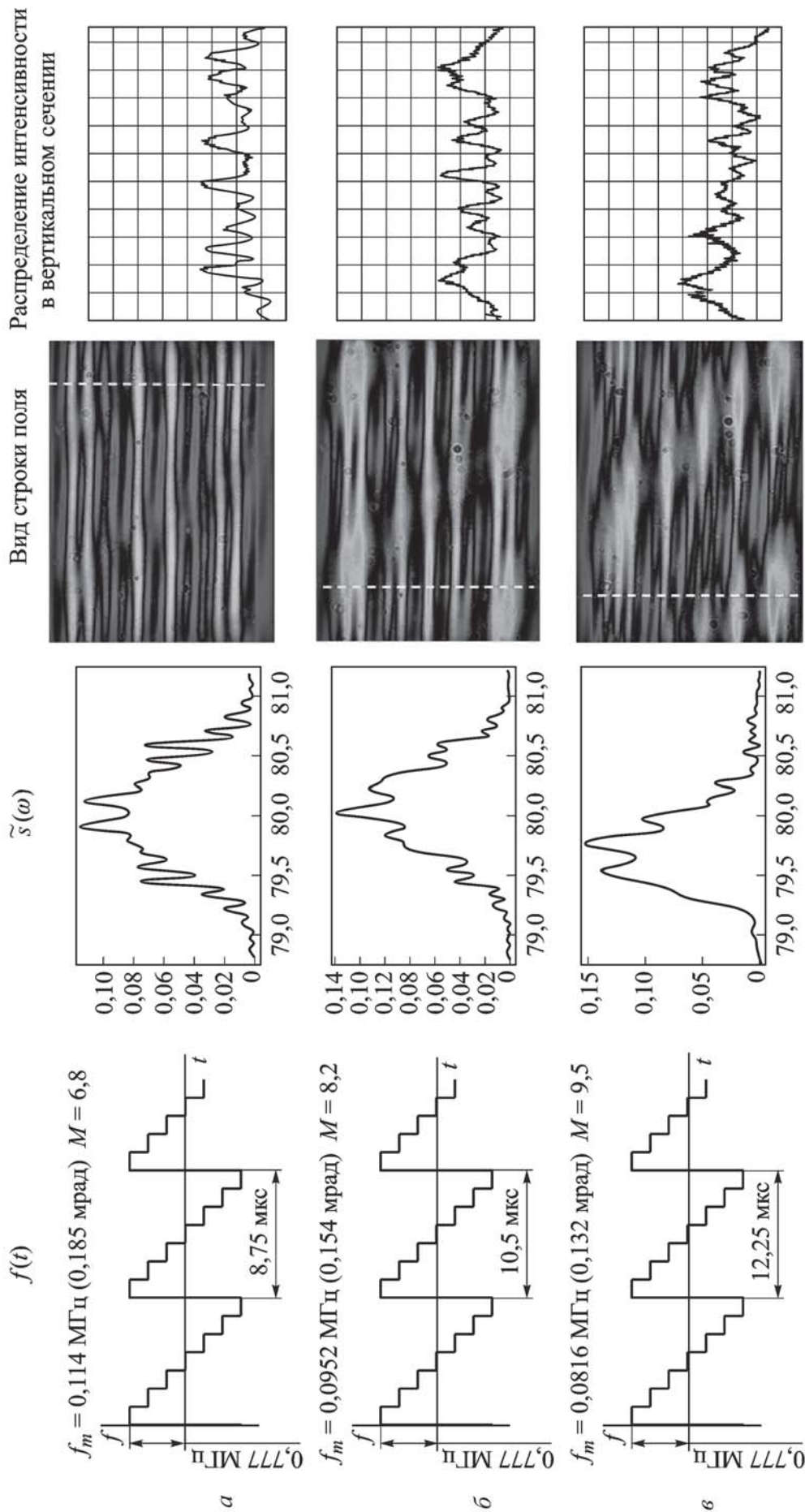


Рис. 7. Управляющие сигналы, вычисленный пространственный спектр интенсивности, вид фрагмента строки опорного поля и поперечное распределение интенсивности в строке при $T_0 > \tau_{eff}$

и 0,627 МГц соответственно. Параметры частотной модуляции управляющего сигнала (частота $f_m = T_0^{-1}$ и индекс $M = \Delta\omega/f_m$) при этом составили: $f_m = 0,5; 0,333; 0,25$ МГц и $M = 0,7; 1,1; 2,5$.

Анализ полученных спектров дифрагированного пучка позволяет сделать вывод, что при выполнении условия (17) вид спектра соответствует спектру частотно-модулированного сигнала, число энергетически значимых гармоник в котором определяется индексом частотной модуляции из расчета $2M + 1$. Спектр стационарен, т.е. не зависит от определенного временного момента рассмотрения сигнала t' , и эквидистантен с шагом, определяемым значением частотной модуляции f_m . Выводы о стационарности спектра подтверждаются однородным распределением интенсивности в горизонтальном сечении зарегистрированных многолучевых дифрагированных порядков, а измеренные угловые пространственные интервалы отдельных компонент многолучевого порядка ($\Delta\theta = 0,81; 0,546; 0,407$ мрад), показанные на вертикальном сечении интенсивности, обнаруживают их точное соответствие расчетным значениям

$$\Delta\theta = f_m \frac{\lambda}{v}. \quad (18)$$

Расходимость отдельных гармоник во многолучевом дифракционном порядке равна расходимости падающего на акустооптический дефлектор пучка.

В аналитическом виде результат в этом случае можно представить рядом Фурье

$$I_d(\theta_x, \theta_y) = \sum_{-\infty}^{+\infty} |A_m|^2 I_i\left(\theta_x - m f_m \frac{\lambda}{v}, \theta_y\right), \quad (19)$$

в котором $I_i(\cdot)$ — распределение интенсивности i -й составляющей многолучевого дифрагированного порядка, а амплитуды гармоник определяются выражением

$$A_m = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} s(t) e^{-im2\pi f_m t} dt.$$

Использовать управляющие сигналы данной группы в системах телеориентации затруднительно из-за большого диапазона изменения интенсивности в получаемых многолучевых дифракционных порядках.

Далее рассмотрим вторую область параметров управляющего ЧМп сигнала, которой соответствует условие

$$T_0 \approx \tau_{eff}. \quad (20)$$

На рис. 8 показаны результаты моделирования и экспериментального исследования дифрагированного пучка для управляющего сиг-

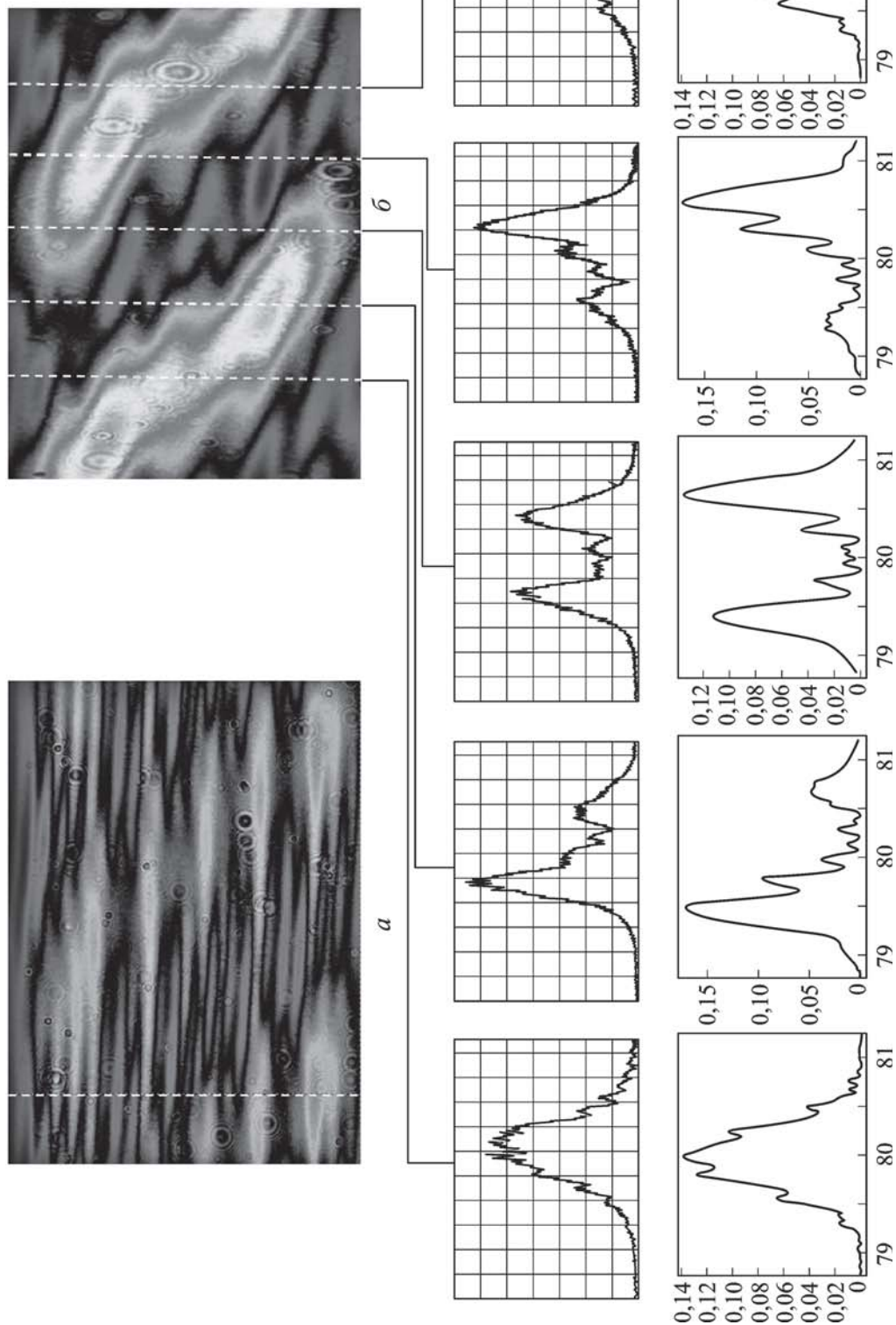


Рис. 8. Экспериментальные и вычисленные мгновенные сечения интенсивности многолучевого дифракционного порядка в различные моменты t' в фокальной плоскости измерительного объекта (а) и в смещенной плоскости под влиянием управляющего сигнала (б)

нала, соответствующего (20). Очевидно, что для уменьшения разреженности гармоник многолучевого дифракционного порядка необходимо уменьшать частоту модуляции сигнала f_m , поэтому в этой части рассматриваются частоты модуляции $f_m = 0, 2; 0,167$ и $0,143$ МГц с девиацией частот $\Delta\omega = 0,673; 0,725$ и $0,777$ МГц (рис. 6, а–в соответственно).

Анализ полученных результатов показывает, что при $T_0 \approx \tau_{eff}$ спектр начинает терять стационарность. При этом наблюдается смешанный вид спектра, состоящий из отдельных гармоник, но при наличии постоянной составляющей, которая флуктуирует во времени, что хорошо заметно на изображении многолучевого дифракционного порядка (третья колонка), где можно наблюдать увеличение и уменьшение интенсивности по мере горизонтального движения пучка, особенно при $T_0 = 7$ мкс. Появление в дифрагированном спектре постоянной составляющей можно объяснить приближением частоты модуляции f_m к эффективному частотному размеру акустооптической ячейки $f_{eff} = \tau_{eff}^{-1} = 0,125$ МГц, так как f_{eff} определяет предел разрешения дефлектора по частоте, а поскольку T_0 приближается к τ_{eff} , в каждый момент времени дефлектор “видит” различные частоты, что вызывает движение постоянной составляющей.

Таким образом, при управляющем сигнале с $T_0 = 7 \dots 8$ мкс перепады интенсивности в пределах опорного поля составляют от 2 до 4 раз.

Рассмотрим третью область параметров управляющих сигналов, если

$$T_0 \geq \tau_{eff}. \quad (21)$$

В данном случае анализируются сигналы с частотами модуляции $f_m = 0,114; 0,0952; 0,0816$ МГц и девиацией частот $\Delta\omega = 0,777$ МГц (рис. 7).

Пространственные спектры этой области становятся нестационарными, в пространстве которых положение определяется набором частот, присутствующих в данный момент в апертуре дефлектора. Отметим, что спектры при $T_0 > \tau_{eff}$ вырождаются в сплошные, поскольку акустооптическая ячейка не разрешает частоты, расстояние между которыми превышает $f_{eff} = 0,125$ МГц. Регистрируемые изображения строки имеют ярко выраженные неоднородности интенсивности по мере горизонтальной развертки многолучевого дифракционного порядка.

Отметим, что рассчитанные пространственные спектры интенсивности несколько отличаются от соответствующих измеренных сечений. Это объясняется проявлением эффекта цилиндрической линзы [5], вызывающего дополнительную фокусировку дифрагированного излучения, вследствие чего плоскость анализа смещается ближе или

дальше фокусного расстояния контрольного объектива в зависимости от направления изменения частоты управляющего сигнала.

Проведем подробный анализ сигнала при $T_0 = 12,25$ мкс. На рис. 8 представлен зарегистрированный вид строки поля в фокальной плоскости измерительного объектива (а) и в плоскости анализа, смещенной ближе к объективу (б). На рис. 8, б показаны пять мгновенных сечений многолучевого порядка с интервалом 3 мкс в паре с соответствующей расчетной формой спектра интенсивности.

Можно отметить, что расчетные и измеренные сечения интенсивности имеют хорошее совпадение. Их вид легко объясняется процессом постепенного заполнения эффективной временной апертуры акустооптической ячейки модулированным сигналом, при котором дефлектор “видит” сначала целый период набора частот управляющего сигнала, а затем апертуру начинает заполнять новый период набора частот, и в некоторый момент в апертуре присутствуют начало одного и конец другого периода управляющего сигнала, что соответствует третьему сечению на рис. 8, б, при котором формируется мгновенный спектр с двумя выраженными максимумами на краях частотного диапазона.

Управляющие сигналы последнего типа использовать для систем телеориентации следует с осторожностью, поскольку, несмотря на достаточно равномерные сечения интенсивности, необходимо принять во внимание, что часть энергии пучка при горизонтальной развертке смещается также и по диагонали. Это обстоятельство может приводить к искажению формы импульса, выделяемой фотоприемным устройством системы телеориентации и, как следствие, к дополнительному падению пропускной способности канала управления.

В заключение сформулируем основные выводы проведенного исследования. Наличие частотно-временной апертуры в акустооптической ячейке позволяет представлять процесс акустооптического взаимодействия световых и акустических волн как результат преобразования Фурье управляющего сигнала с окном в виде функции Гаусса (преобразования Габора), с которым ассоциирована акустооптическая ячейка. Данный подход существенно расширяет класс анализируемых управляющих сигналов, позволяя исследовать сигналы с переменным во времени спектром в реальном масштабе времени.

В целом характеристики многолучевого дифрагированного порядка определяются параметрами частотной модуляции управляющего сигнала. Число гармоник в дифрагированном пространственном спектре интенсивности определяется индексом частотной модуляции M , а фиксированный пространственный интервал между ними — (с точностью до постоянного множителя) частотой модуляции f_m управляющего сигнала.

Важнейшим параметром, оказывающим существенное влияние на характеристики дифрагированных спектров, является эффективный размер временной τ_{eff} (или частотной f_{eff}) апертуры дефлектора, который можно использовать для классификации управляющих сигналов.

В ходе исследования было установлено, что наиболее перспективными для использования в системах телеориентации являются частотно-манипулированные сигналы с периодом модулирующей функции $T_0 \approx \tau_{eff}$, позволяющие формировать квазиравномерные по интенсивности опорные поля. При этом удается получить почти стационарный спектр многолучевого дифрагированного порядка с перепадами интенсивности более чем в два-четыре раза. При $T_0 < \tau_{eff}$ спектр дифрагированного пучка стационарен, но сильно разрежен в пространстве, с существенными энергетическими провалами в сечении формируемой строки, что может приводить к сильной неоднородности пропускной способности канала управления в пределах опорного поля. Если выполняется условие $T_0 > \tau_{eff}$, то пространственный спектр интенсивности становится нестационарным, с флуктуирующим во времени положением и значением, что может приводить к изменению формы импульса, регистрируемого фотоприемным устройством системы телеориентации, и уменьшению пропускной способности канала управления.

Предложенный метод расчета пространственных спектров и распределения интенсивности в многолучевом дифракционном порядке позволил сформировать квазиравномерные по интенсивности опорные поля в сканирующей системе телеориентации без заметных энергетических провалов, что обеспечило выравнивание пропускной способности канала управления в пределах опорного поля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондаренко Д. А., Карасик В. Е., Семенов В. П. Исследование режима дифракции лазерного пучка на линейно частотно-модулированной волне в анизотропном акустооптическом дефлекторе // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Спец. вып. “Современные проблемы оптотехники”. – 2011.
2. Антонов С. Н., Резвов Ю. Г. Высокоэффективная многолучевая брэгговская акустооптическая дифракция при фазовой оптимизации поличастотной акустической волны // ЖТФ. – 2007. – Т. 77, вып. 8.
3. Семенов В. П. Способ формирования информационного поля лазерной системы телеориентации и устройство для его осуществления. Патент РФ № 2080615. Заявл. 06.07.1994.
4. Чуи К. Введение в вейвлеты. – М.: Мир, 2001.
5. Балакши й В. И., Парыгин В. Н. Акустооптические системы непрерывного сканирования света // Радиотехника и электроника. – 1974. – Т. 19, № 10. – С. 2153–2169.

Статья поступила в редакцию 2.03.2012

Дмитрий Анатольевич Бондаренко родился в 1975 г., окончил МИИГАиК в 2000 г. Начальник лаборатории ФГУП ГРПЗ. Аспирант кафедры “Лазерные и оптико-электронные системы” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Специализируется в области лазерных оптико-электронных приборов и лазерных систем управления.

D.A. Bondarenko (b. 1975) graduated from the Moscow Institute for Engineers in Geodesy, Air-Photography and Cartography in 2000. Ph. D. (Eng.), head of laboratory of FGUP GRPZ. Post-graduate of “Laser and Optic-Electronic Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University. Specializes in the field of optic-electronic instruments and laser control systems.

Валерий Ефимович Карасик родился в 1939 г., окончил в 1964 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Д-р техн. наук, профессор кафедры “Лазерные и оптико-электронные системы” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 120 научных работ в области лазерного зондирования, локации и дальнометрии.

V.Ye. Karasik (b. 1939) graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1964. D. Sc. (Eng.), professor of “Laser and Optic-Electronic Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 120 publications in the field of laser sounding, location, laser ranging.

Виктор Прович Семенков родился в 1948 г., окончил в 1972 г. Ленинградский электротехнический институт им. В.И. Ульянова (Ленина). Канд. техн. наук, главный конструктор по направлению ФГУП ГРПЗ. Автор более 100 научных работ и патентов в области лазерных систем управления и акустооптики.

V.P. Semenkov (b. 1948) graduated from the Leningrad Electrotechnical Institute n.a. V.I. Ul'yanov (Lenin) in 1972. Ph. D. (Eng.), chief designer in trend of FGUP GRPZ. Author of more than 100 publications in the field of laser control systems and acousto-optics.